Revista EIA, ISSN 1794-1237 Número 14, p. 9-22. Diciembre 2010
Escuela de Ingeniería de Antioquia, Medellín (Colombia)

# CALIBRACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO MG PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES MÁXIMOS EN COLOMBIA

Andrés Felipe Duque*
Carlos Restrepo**

## RESUMEN

El propósito de este trabajo es calibrar un modelo para la estimación de caudales máximos que se adapte a las características hidrológicas, geomorfológicas y de cobertura vegetal de las cuencas colombianas. Por esta razón, se calibraron los parámetros del modelo probabilístico MG para todo el territorio colombiano, sus principales regiones geográficas y subregiones hidrológicamente homogéneas. Para la obtención de las ecuaciones analíticas del modelo MG se utilizaron los registros históricos de caudales máximos de 277 estaciones limnigráficas distribuidas a lo largo del territorio colombiano. Los resultados obtenidos aplicando el modelo MG calibrado y otros métodos comúnmente utilizados con el mismo propósito fueron comparados entre sí y se encontraron valores muy semejantes. El modelo MG calibrado en este trabajo se muestra como una opción viable para la estimación de caudales máximos en cuencas con información escasa en Colombia.

PALABRAS CLAVE: caudales máximos; modelo MG; datos hidrológicos.

# CALIBRATION AND IMPLEMENTATION OF MG MODEL FOR ESTIMATING PEAK FLOWS IN COLOMBIA

## ABSTRACT

The purpose of this paper is calibrate a model for estimating peak flows adapted to the hydrological, geomorphological, and vegetation cover in Colombian basins. For this reason, the parameters of probabilistic MG model were calibrated for the whole territory of Colombia, its major geographic regions and hydrologically homogeneous subregions. To obtain the analytical equations of the MG model, historical records of peak flows

* Ingeniero Civil, Escuela de Ingeniería de Antioquia. Ingeniero de Diseño, I-Consult. Medellín, Colombia. ifanduq@eia.edu.co; andresfduque@gmail.co

** Magíster y Doctor (c) en Ingeniería área Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Profesor de cátedra, Escuela de Ingeniería de Antioquia. Medellín, Colombia. cart170@gmail.com

Artículo recibido 12-III-2010. Aprobado 25-VIII-2010
Discusión abierta hasta junio de 2011

in 277 water level recorder stations in Colombian were used. The obtained results by applying the MG calibrated model and other commonly used methods to estimate peak flows were compared, and very similar values were found. The MG model calibrated in this work is shown as a viable option for estimating peak flows in basins with scarce data in Colombia.

KEY WORDS: peak flows; MG model; hydrologic data.

## CALIBRAÇÃO E IMPLEMENTAÇÃO DO MODELO MG PARA A ESTIMATIVA DE CAUDAIS MÁXIMOS NA COLÔMBIA

**RESUMO**

O propósito deste trabalho é calibrar um modelo para a estimativa de caudais máximos que se adapte às características hidrológicas, geomorfológicas e de cobertura vegetal das bacias colombianas. Por esta razão, se calibraram os parâmetros do modelo probabilístico MG para todo o território colombiano, suas principais regiões geográficas e sub-regiões hidrologicamente homogêneas. Para a obtenção das equações analíticas do modelo MG se utilizaram os registros históricos de caudais máximos de 277 estações limnigráficas distribuídas ao longo do território colombiano. Os resultados obtidos aplicando o MG calibrado e outros métodos comumente utilizados com o mesmo propósito foram comparados entre si e se encontraram valores muito semelhantes. O modelo MG calibrado neste trabalho se amostra como uma opção viável para a estimativa de caudais máximos em bacias com informação escassa na Colômbia.

PALAVRAS CÓDIGO: caudais máximos; modelo MG; dados hidrológicos.

## 1. INTRODUCCIÓN

La estimación de caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno es de suma importancia para la evaluación de los riesgos de inundación en zonas urbanas y rurales, también es determinante para la construcción de obras hidráulicas tales como presas, diques, canales, puentes y obras asociadas al diseño y construcción de vías, debido a que de esta estimación depende el dimensionamiento de las obras hidráulicas y las de prevención o mitigación. De esta situación deriva la necesidad de estudiar el comportamiento de las crecientes en las diferentes regiones del país, para así poder encontrar formas de minimizar el impacto de tales eventos en la vida de las personas.

Si los modelos que se aplican no son los adecuados o se usan de una manera incorrecta, se puede incurrir en errores de sobreestimación o subestimación de los caudales máximos, lo que puede llevar a elevar los costos de las obras hidráulicas o a correr un mayor riesgo de inundación para la población. Por eso es necesario tener modelos bien calibrados para la estimación de caudales máximos en el territorio colombiano.

En este trabajo se muestran los resultados de la calibración del modelo MG (Maione, 1997; Beretta, Maione y Tomirotti, 2001) para la estimación de caudales máximos en cuencas con información escasa, la cual se realizó a partir de la información de las series de caudales máximos instantáneos históricos de 277 estaciones limnigráficas ubicadas sobre ríos colombianos. El modelo calibrado en este trabajo se comparó con el modelo MG calibrado por Maione (1997), el modelo MG calibrado por Vélez, Quintero y Delgado (2006) y el método de análisis de frecuencias (Chow, Maidment y Mays, 1994).

## 2. MODELO MG

Según Vélez, Quintero y Delgado (2006), el modelo MG es un modelo regional desarrollado por Maione (1997), el cual permite calcular caudales asociados a periodos de retorno altos, a partir de



la media de las series históricas, $\mu$, y del parámetro $Cv=\sigma/\mu$ (coeficiente de variación), donde $\sigma$ es la desviación estándar de los caudales máximos instantáneos, por medio de una ecuación que relaciona los dos parámetros de acuerdo con:

$$\frac{Q}{\mu}=1+a\cdot Cv^{b} \tag{1}$$

donde *a* y *b* son parámetros del modelo.

Se define una variable estandarizada *Y* así:

$$Y=\frac{Q/\mu-1}{Cv^{b}}=\frac{Q-\mu}{\sigma\cdot Cv^{b-1}} \tag{2}$$

donde *Y* es una variable adimensional cuya distribución de probabilidad es constante para todos los sitios considerados (Maione, 1997; Beretta, Maione y Tomirotti, 2001); si se aproxima la distribución de probabilidades de *Y* en su parte central a una función logarítmica se tiene que:

$$Y=A+C\cdot\ln(T_r) \tag{3}$$

donde *A* y *C* son parámetros del modelo. Si esta ecuación se expresa en términos de la variable $Q/\mu$ se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{Q}{\mu}=1+\left(A+C\cdot\ln\left(T_r\right)\right)\cdot Cv^{b} \tag{4}$$

La ecuación 4 es la ecuación analítica del modelo.

El modelo MG fue calibrado inicialmente con 7.300 series históricas de caudales máximos instantáneos anuales de estaciones de Italia, Suiza, Gran Bretaña, Estados Unidos, Etiopía y Perú, cuyas ecuaciones resultantes son las siguientes (Maione y Tomirotti, 2004):

$$Y=\frac{Q/\mu-1}{Cv^{1,33}}=\frac{Q-\mu}{\sigma\cdot Cv^{0,33}} \tag{5}$$

$$Y=0{,}37+0{,}80\cdot\ln(T_r) \tag{6}$$

$$\frac{Q}{\mu}=1+\left(0{,}37+0{,}80\cdot\ln\left(T_r\right)\right)\cdot Cv^{1,330} \tag{7}$$

La principal ventaja del modelo MG, con respecto a otras metodologías, radica en que puede ser calibrado en función de los caudales máximos históricos de las series, y de esta forma permite evaluar la tendencia de dichos máximos históricos en el nivel regional, sin considerar caudales pico que se han presentado en las series y que obedecen a periodos de retorno menores, eliminando un posible enmascaramiento de los datos cuando se realizan análisis de valores extremos medios.

## 3. METODOLOGÍA

El primer paso que se siguió fue la adquisición de los registros de las series históricas de caudales máximos instantáneos, los cuales se obtuvieron a partir de la información disponible de las estaciones limnigráficas almacenadas en las bases de datos del programa HidroSIG v3.1 (Unalmed, 2003). En estas bases de datos se encontró un total de 342 estaciones con información de caudales máximos instantáneos mensuales.

Inicialmente, para consolidar las series de caudales máximos anuales instantáneos en cada estación, se estableció un umbral del 40 % de datos mensuales faltantes admisibles, así que un año se considera faltante cuando carece de más de cuatro datos de la serie mensual de caudales máximos instantáneos.

Luego se construyeron histogramas de la longitud de las series históricas resultantes y de porcentaje de datos faltantes, a partir de los cuales se determinaron los umbrales mínimos permitidos para estas variables. Tratando de incorporar a la muestra más de un evento extremo asociado a la ocurrencia del ENOS (El Niño-Oscilación Sur), que tiene un periodo de recurrencia de entre 3 y 5 años en sus fases cálida y fría, y cuyos efectos sobre los caudales en las regiones Centro y Occidente del país han sido estudiados por Mesa, Poveda y Carvajal (1997) y por Unalmed y UPME (2000), se consideraron las series con una longitud mayor que o igual a 8 años. Por

otro lado, no fueron consideradas en la calibración las estaciones con más del 30 % de caudales máximos instantáneos anuales faltantes.

Las series que superaron este umbral fueron sometidas a un análisis estadístico para determinar su grado de confiabilidad. A cada una de las series se le realizaron las siguientes pruebas:

- Pruebas de cambio de la media:
  Mann-Whitney
  Signo
- Pruebas de tendencia de la media:
  T-Lineales
  Hotelling-Pabst
  Mann-Kendall
  Sen
- Pruebas de independencia de datos:
  Corridas
  Spearman
  Punto cambiante
  Autocorrelograma de Anderson

Estas pruebas fueron realizadas para un nivel de significación de 0,05, y se efectuaron en el software ANSET (Ceballos y Góez, 2003), que se encuentra como una aplicación del HidroSIG v3.1. Dada la escasez de información, algunas de las series históricas de caudales máximos instantáneos anuales que no pasaron determinadas pruebas estadísticas se sometieron a un análisis gráfico, con base en el cual se determinó si el comportamiento de la serie no era tan atípico comparado con el resto de series analizadas, y así incluirlas en los cálculos posteriores. Mediante el mismo análisis gráfico se estableció si algún tramo de la serie tenía un comportamiento anómalo, para eliminarlo de la serie, pero conservando la información restante que sí cumpliera con los criterios de calidad establecidos. De 342 estaciones con información de caudales máximos instantáneos sólo 277 estaciones cumplieron con los estándares de calidad establecidos.

Después de esto, se trazaron las subregiones hidrológicamente homogéneas de Colombia y sus principales regiones geográficas, según la propuesta presentada por la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín –Unalmed– y Unidad de Planeación Minero-Energética –UPME– (2000), identificando el número de estaciones que se encuentran dentro de cada región y subregión.

Con la información ya consolidada, se calibró el modelo MG para toda Colombia y para cada una de las regiones y subregiones definidas, aplicando la metodología desarrollada por Maione y Tomirotti (2004). Adicionalmente, dado que se recomienda el uso de la función de distribución de probabilidad de Gumbel o extrema tipo I para el análisis de eventos extremos máximos cuando los datos son escasos (Unalmed y Convenio Interinstitucional Cátedra del Agua, 2001), se estiman las probabilidades de ocurrencia de los caudales máximos de las diferentes series empleando esta función de distribución de probabilidad, y luego se realizan las regresiones para estimar los parámetros de la variable *Y*. De esta manera se obtienen las ecuaciones calibradas del modelo MG.

## 4. INFORMACIÓN UTILIZADA PARA LA CALIBRACIÓN DEL MODELO MG EN COLOMBIA

Para la calibración del modelo MG en Colombia se utilizaron 277 estaciones limnigráficas distribuidas en todo el territorio (ver figuras 1 y 2), las cuales tienen una longitud de registros de caudales máximos entre 8 y 61 años. Las áreas de las cuencas afluentes a las estaciones de medición varían en tamaños que van desde 13 $km^2$ hasta 164.302 $km^2$.

En las tablas 1 y 2 se muestra la distribución geográfica de las estaciones consideradas en la calibración del modelo por regiones y subregiones hidrológicamente homogéneas, respectivamente.

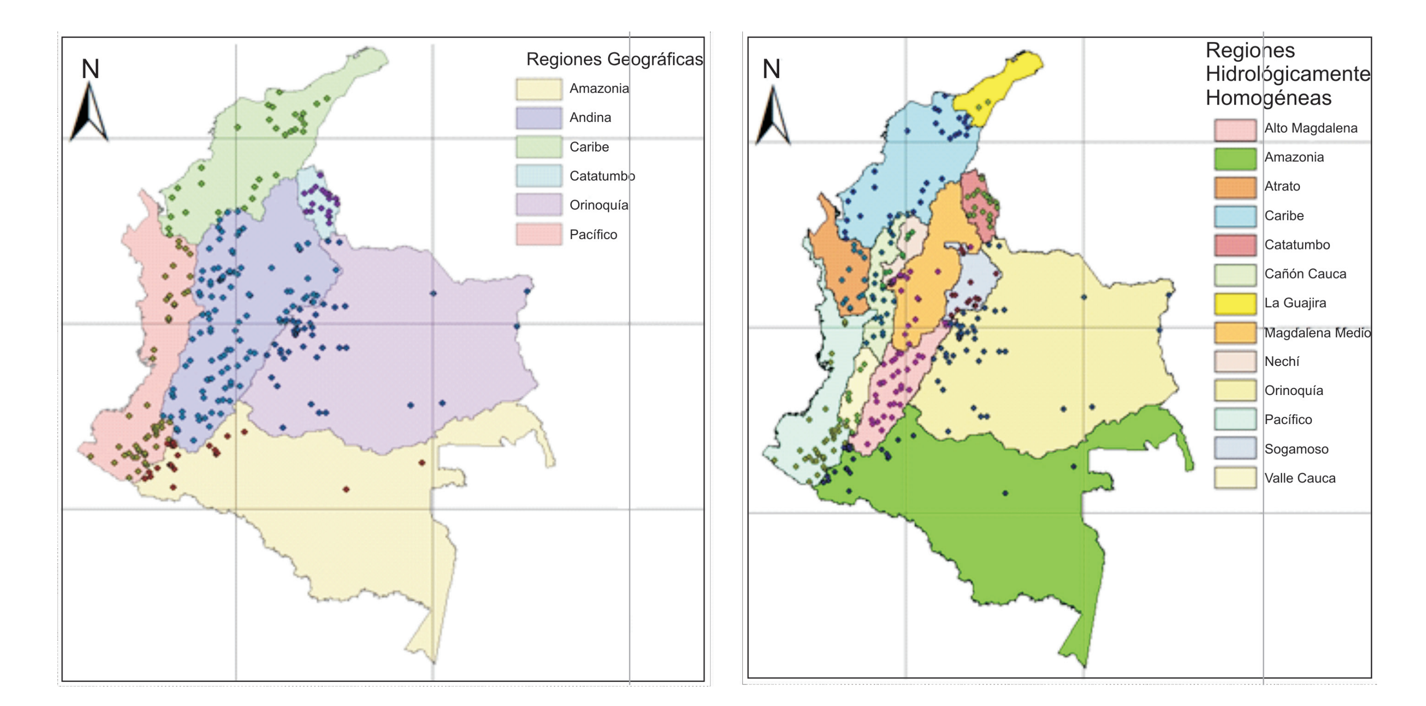



**Figura 1.** Localización de las estaciones limnigráficas consideradas en la calibración del modelo a) por regiones; (b) por subregiones hidrológicamente homogéneas

**Tabla 1.** Distribución geográfica de las estaciones limnigráficas consideradas en la calibración del modelo, por regiones

| Región | Número de estaciones | Menor longitud de serie (años) | Mayor longitud de serie (años) | Longitud media de las series (años) | Área mínima (km²) | Área máxima (km²) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Amazonía | 22 | 9 | 40 | 21 | 46 | 68.022 |
| Andina | 113 | 8 | 61 | 23 | 13 | 54.359 |
| Caribe | 33 | 8 | 38 | 23 | 28 | 164.302 |
| Catatumbo | 19 | 19 | 47 | 29 | 23 | 5.177 |
| Orinoquía | 42 | 8 | 39 | 19 | 30 | 74.895 |
| Pacífico | 48 | 8 | 46 | 21 | 19 | 14.935 |
| Colombia | 277 | 8 | 61 | 23 | 13 | 164.302 |

**Tabla 2.** Distribución geográfica de las estaciones limnigráficas consideradas en la calibración del modelo, por subregiones hidrológicamente homogéneas

| Subregión | Número de estaciones | Menor longitud de serie (años) | Mayor longitud de serie (años) | Longitud media de las series (años) | Área mínima ($km^2$) | Área máxima ($km^2$) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Amazonía | 22 | 9 | 40 | 21 | 46 | 68.022 |
| Sogamoso | 16 | 15 | 40 | 26 | 30 | 21.513 |
| Nechí | 8 | 10 | 39 | 22 | 23 | 8.320 |
| Magdalena Medio | 21 | 8 | 61 | 23 | 19 | 54.359 |
| Alto Magdalena | 36 | 10 | 51 | 24 | 71 | 26.115 |
| Valle del Cauca | 10 | 16 | 33 | 23 | 33 | 948 |
| Cañón del Cauca | 22 | 10 | 30 | 18 | 13 | 42.404 |
| Caribe | 28 | 8 | 38 | 23 | 28 | 164.302 |
| La Guajira | 5 | 9 | 30 | 21 | 29 | 2.440 |
| Catatumbo | 19 | 19 | 47 | 29 | 23 | 5.177 |
| Orinoquía | 42 | 8 | 39 | 19 | 30 | 74.895 |
| Pacífico | 35 | 8 | 46 | 21 | 19 | 13.197 |
| Atrato | 13 | 14 | 38 | 27 | 325 | 14.935 |
| Colombia | 277 | 8 | 61 | 23 | 13 | 164.302 |

## 5. RESULTADOS

Aplicando la metodología desarrollada por Maione (1997) y utilizando la información de caudales máximos disponible en Colombia, se obtuvo la relación entre el parámetro *CV* de las series y el caudal estandarizado con respecto a la media, como se muestra en la figura 2.

A partir de este análisis se tiene que:

$$\frac{Q}{\mu} = 1 + 2{,}951 \cdot CV^{1{,}220} \tag{8}$$

De esta ecuación se infiere que los valores de a y b son 2,951 y 1,220, respectivamente.

Se graficaron los valores de *T* contra *Y*, como se muestra en la figura 3.

De la regresión se tiene que:

$$\mathrm{Y} = 0{,}790 \cdot \ln(\mathrm{T_r}) + 0{,}172 \tag{9}$$

La ecuación 9 en términos de Q/$\mu$ se expresa como:

$$\frac{Q}{\mu} = 1 + \left(0{,}172 + 0{,}790 \cdot \ln(T_r)\right) \cdot CV^{1{,}220} \tag{10}$$

La ecuación 10 es la ecuación analítica del modelo MG calibrado para toda Colombia.

La ecuación calibrada del modelo MG en cada región geográfica y subregión hidrológicamente homogénea de Colombia se obtuvo al realizar este mismo procedimiento con los datos de cada una de las regiones y subregiones. En las tablas 3 y 4 se muestra la ecuación analítica del modelo MG para cada región geográfica y subregión hidrológicamente homogénea. Los parámetros b y *Y* de la ecuación analítica del modelo MG (ecuaciones 1 y 3) se obtuvieron de regresiones matemáticas cuyos coeficientes de correlación (*Ro*) también se muestran en las tablas 3 y 4.



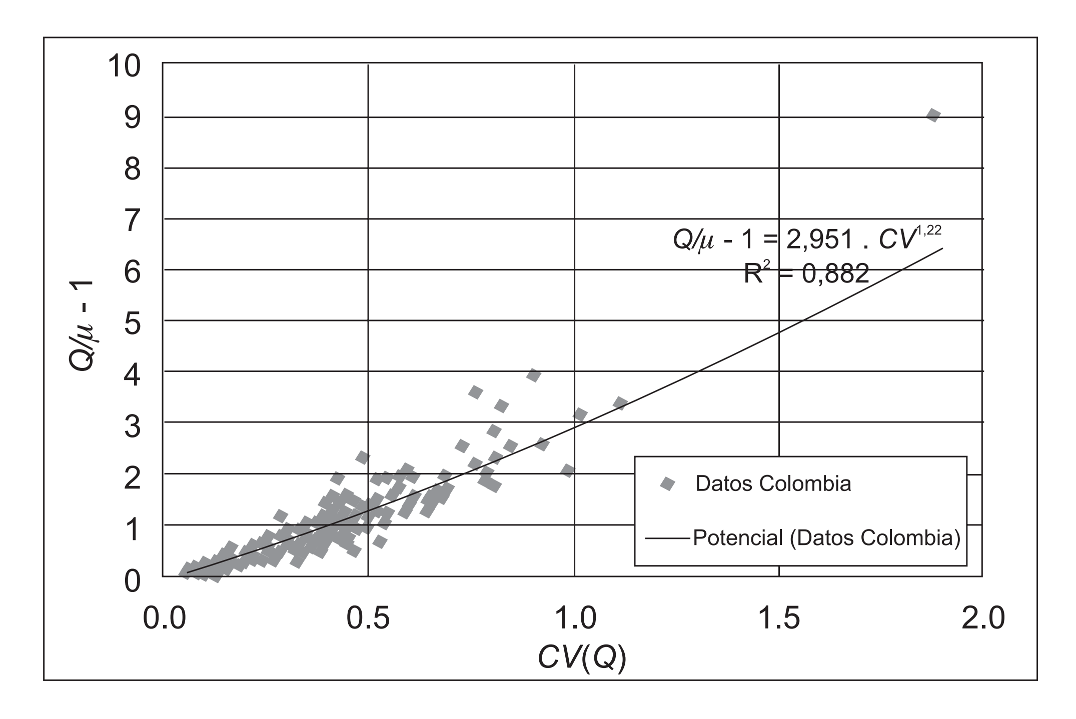



**Figura 2.** Relación entre el coeficiente de variación y el caudal máximo estandarizado con respecto a la media. Calibración para toda Colombia

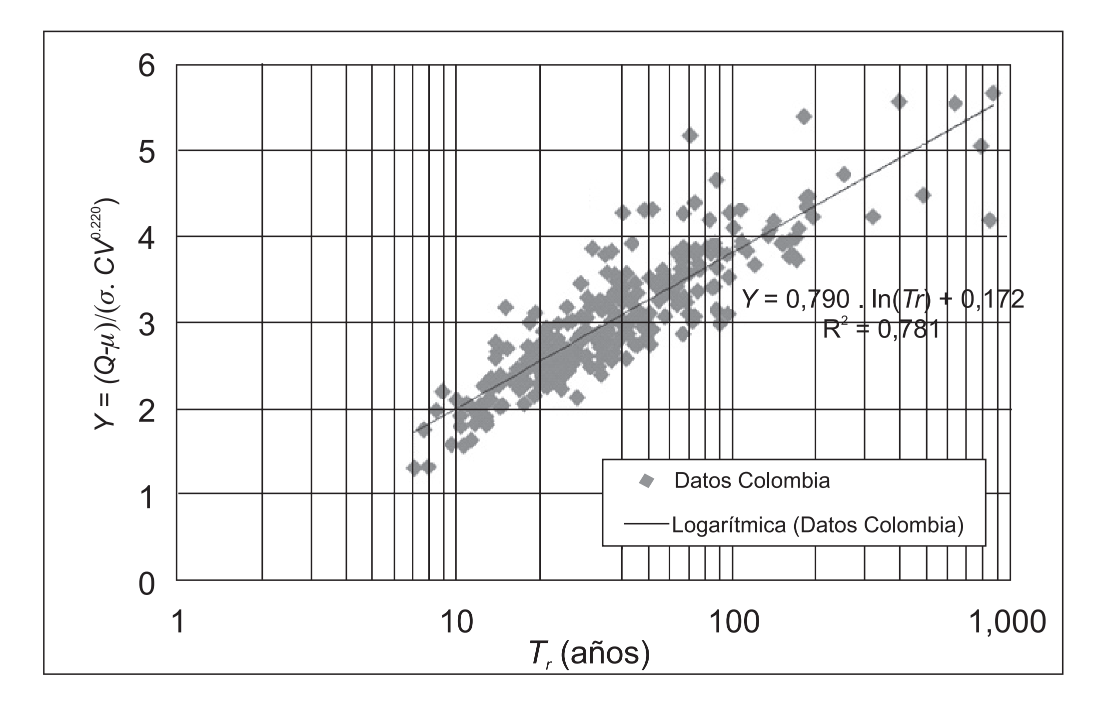



**Figura 3.** Relación entre el periodo de retorno y la variable adimensional *Y.* Calibración para toda Colombia

**Tabla 3.** Ecuación analítica del modelo MG calibrado para las principales regiones geográficas y los respectivos coeficientes de correlación de los parámetros *b* y *Y*

| Región | Ecuación | ***Ro*** | |
|---|---|---|---|
| | | ***b*** | ***Y*** |
| Colombia | $\frac{Q}{\mu}=1+\left(0{,}172+0{,}790\cdot\ln\left(T_r\right)\right)\cdot CV^{1{,}220}$ | 0,939 | 0,884 |
| Amazonía | $\frac{Q}{\mu}=1+\left(0{,}962\cdot\ln\left(T_r\right)-0{,}530\right)\cdot CV^{1{,}152}$ | 0,899 | 0,972 |
| Andina | $\frac{Q}{\mu}=1+\left(0{,}267+0{,}825\cdot\ln\left(T_r\right)\right)\cdot CV^{1{,}298}$ | 0,908 | 0,882 |
| Caribe | $\frac{Q}{\mu}=1+\left(0{,}129+0{,}729\cdot\ln\left(T_r\right)\right)\cdot CV^{1{,}151}$ | 0,966 | 0,888 |
| Catatumbo | $\frac{Q}{\mu}=1+\left(0{,}837\cdot\ln\left(T_r\right)-0{,}286\right)\cdot CV^{1{,}180}$ | 0,897 | 0,959 |
| Orinoquía | $\frac{Q}{\mu}=1+\left(1{,}461+0{,}529\cdot\ln\left(T_r\right)\right)\cdot CV^{1{,}306}$ | 0,968 | 0,684 |
| Pacífico | $\frac{Q}{\mu}=1+\left(0{,}853\cdot\ln\left(T_r\right)-0{,}334\right)\cdot CV^{1{,}138}$ | 0,919 | 0,961 |

**Tabla 4.** Ecuación analítica del modelo MG calibrado para las subregiones hidrológicamente homogéneas y los respectivos coeficientes de correlación de los parámetros *b* y *Y*

| Subregión | Ecuación | ***Ro*** | |
|---|---|---|---|
| | | ***b*** | ***Y*** |
| Amazonía | $\frac{Q}{\mu}=1+\left(0{,}962\cdot\ln\left(T_r\right)-0.530\right)\cdot CV^{1{,}152}$ | 0,808 | 0,945 |
| Sogamoso | $\frac{Q}{\mu}=1+\left(1{,}019\cdot\ln\left(T_r\right)-0{,}201\right)\cdot CV^{1{,}449}$ | 0,648 | 0,803 |
| Nechí | $\frac{Q}{\mu}=1+\left(0{,}696+0{,}707\cdot\ln\left(T_r\right)\right)\cdot CV^{1{,}307}$ | 0,908 | 0,666 |
| Magdalena Medio | $\frac{Q}{\mu}=1+\left(0{,}227+0{,}859\cdot\ln\left(T_r\right)\right)\cdot CV^{1{,}296}$ | 0,857 | 0,703 |
| Alto Magdalena | $\frac{Q}{\mu}=1+\left(0{,}054+0{,}810\cdot\ln\left(T_r\right)\right)\cdot CV^{1{,}217}$ | 0,739 | 0,894 |

→



| Subregión | Ecuación | Ro | |
|---|---|---|---|
| | | b | Y |
| Valle del Cauca | $\frac{Q}{\mu} = 1 + (1{,}995 + 0{,}519 \cdot \ln(Tr)) \cdot CV^{1{,}407}$ | 0,942 | 0,448 |
| Cañón del Cauca | $\frac{Q}{\mu} = 1 + (0{,}057 + 0{,}816 \cdot \ln(T_r)) \cdot CV^{1{,}231}$ | 0,900 | 0,731 |
| Caribe | $\frac{Q}{\mu} = 1 + (0{,}251 + 0{,}717 \cdot \ln(T_r)) \cdot CV^{1{,}162}$ | 0,938 | 0,748 |
| La Guajira | $\frac{Q}{\mu} = 1 + (0{,}224 + 0{,}689 \cdot \ln(T_r)) \cdot CV^{1{,}290}$ | 0,877 | 0,792 |
| Catatumbo | $\frac{Q}{\mu} = 1 + (0{,}837 \cdot \ln(T_r) - 0{,}286) \cdot CV^{1{,}180}$ | 0,804 | 0,920 |
| Orinoquía | $\frac{Q}{\mu} = 1 + (1{,}461 + 0{,}529 \cdot \ln(T_r)) \cdot CV^{1{,}306}$ | 0,937 | 0,468 |
| Pacífico | $\frac{Q}{\mu} = 1 + (0{,}879 \cdot \ln(T_r) - 0{,}334) \cdot CV^{1{,}166}$ | 0,812 | 0,910 |
| Atrato | $\frac{Q}{\mu} = 1 + (0{,}54 + 0{,}794 \cdot \ln(T_r)) \cdot CV^{1{,}216}$ | 0,897 | 0,776 |

## 6. VERIFICACIÓN DEL MODELO

Para comparar los resultados obtenidos en la calibración del modelo, se tomaron cuatro estaciones al azar. A cada una de las estaciones seleccionadas se le aplicaron varios modelos comúnmente utilizados para la estimación de caudales extremos y los resultados obtenidos se compararon con aquellos derivados de la aplicación del modelo MG calibrado en este trabajo. Los modelos aplicados fueron:

- Análisis de frecuencias Gumbel y Log Normal (Chow, Maidment y Mays, 1994)
- Modelo MG calibrado por Maione y Tomirotti (2004)
- Modelo MG calibrado por Vélez, Quintero y Delgado (2006)
- Modelo MG calibrado para toda Colombia en este trabajo
- Modelo MG calibrado en este trabajo para la región geográfica correspondiente
- Modelo MG calibrado en este trabajo para la subregión hidrológicamente homogénea correspondiente

Los resultados obtenidos se muestran en las figuras 4, 5, 6 y 7.

Adicionalmente, para comparar el modelo con respecto a los modelos lluvia-escorrentía, se aplicaron los siguientes modelos para la estimación de caudales máximos en la cuenca del río Tarazá hasta su desembocadura en el río Cauca, cuya área de drenaje es de 1022,43 $km^2$:

- Análisis de frecuencias Gumbel y Log Normal (Chow, Maidment y Mays, 1994)
- Modelo MG calibrado para toda Colombia en este trabajo
- Modelo MG calibrado en este trabajo para la región Andina
- Modelo MG calibrado en este trabajo para la subregión Cañón del Cauca

- Hidrógrafas unitarias de Williams y Hann
- Hidrógrafas unitarias del SCS (Soil Conservation Service)
- Hidrógrafas unitarias de Snyder

Ya que en el punto de desembocadura del río Tarazá en el río Cauca se tienen registros de caudales máximos anuales instantáneos de la estación Las Camelias desde el año 1973 hasta el 2003, excepto en 1986 y 1992 cuando no se tienen registros, se procede a realizar el análisis de frecuencia propuesto por Chow, Maidment y Mays (1994) con los estadísticos de la estación, los cuales se muestran en la tabla 5.

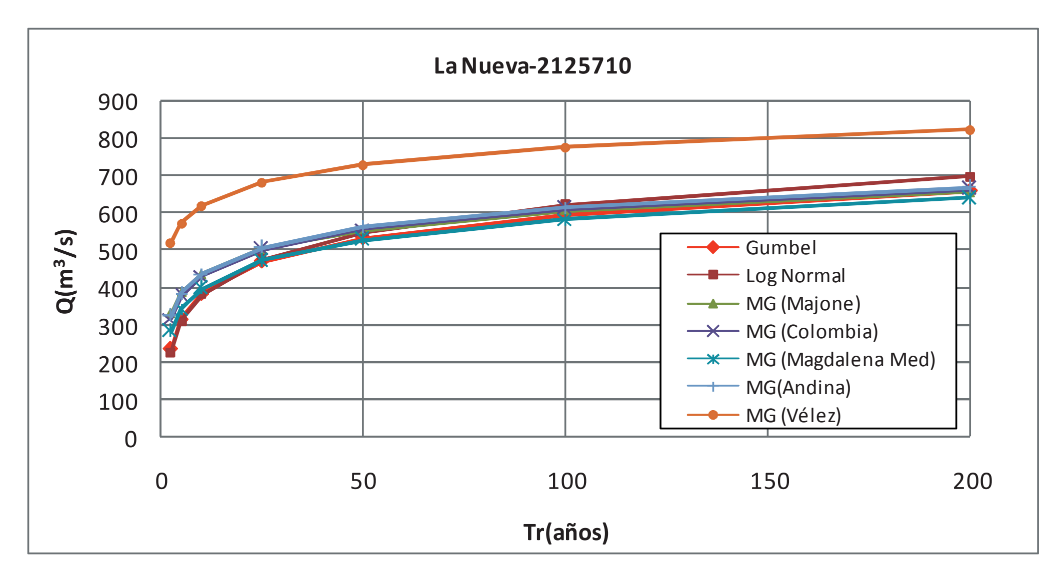



**Figura 4.** Caudales máximos estimados por diferentes métodos en la estación La Nueva, subregión Magdalena Medio

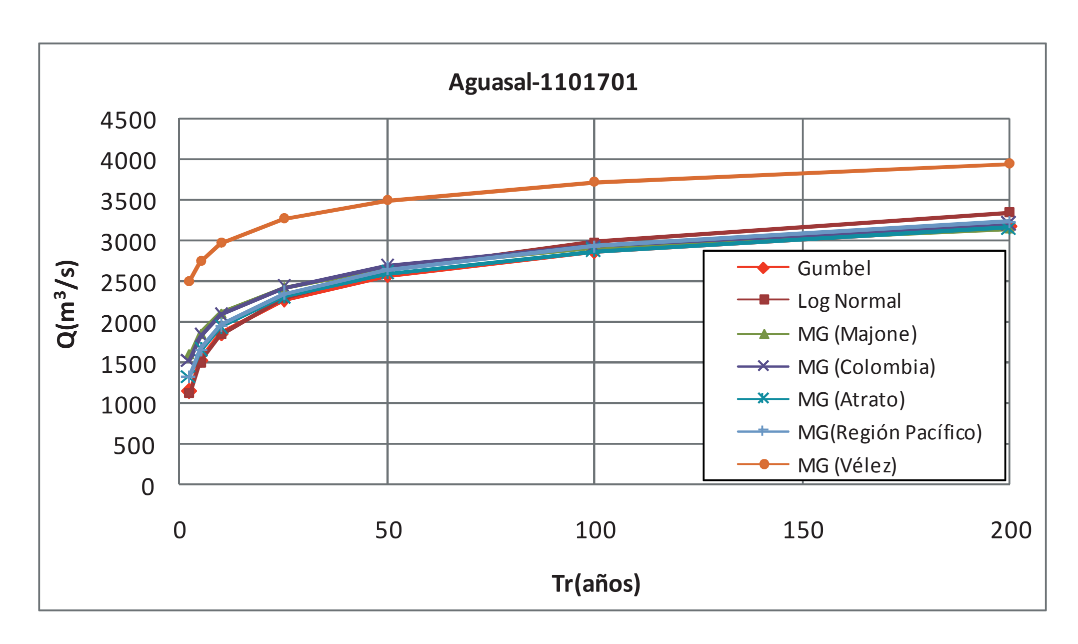



**Figura 5.** Caudales máximos estimados por diferentes métodos en la estación Aguasal, subregión Atrato






**Figura 6.** Caudales máximos estimados por diferentes métodos en la estación Guachicono, subregión Pacífico

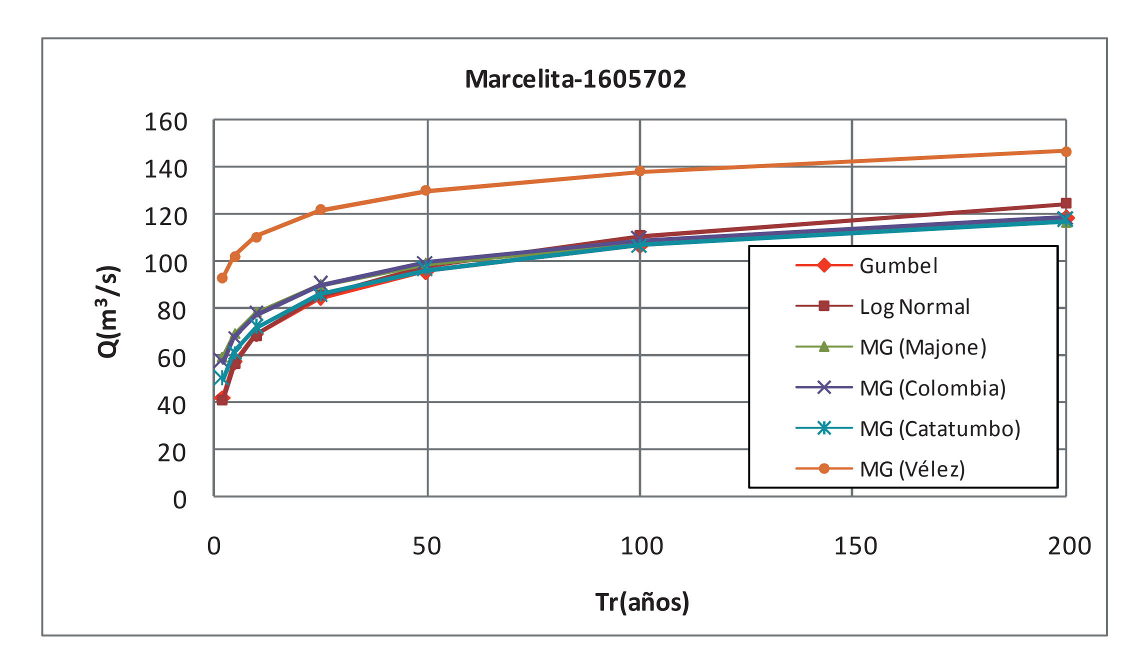



**Figura 7.** Caudales máximos estimados por diferentes métodos en la estación Marcelita, subregión Catatumbo

**Tabla 5.** Estadísticos de la serie de caudales máximos instantáneos de la estación Las Camelias

| $\mu_x$ [m³/s] | $\sigma_x$ [m³/s] | $\mu_y$ [ln(m³/s)] | $\sigma_y$ [ln(m³/s)] |
|---|---|---|---|
| 431,60 | 131,62 | 6,01 | 0,34 |

Aplicando la ecuación de Ven Te Chow:

$$Q_{Tr} = \mu_X + K_{Tr}\sigma_X \qquad (11)$$

Donde $Q_{Tr}$ es el caudal para un periodo de retorno en años, $\mu_x$ y $\sigma_x$ son la media y desviación estándar de los caudales máximos respectivamente, y $K_{Tr}$ es el factor de frecuencia que depende de la función de distribución de probabilidad y del periodo de retorno.

Se obtienen los caudales máximos asociados a diferentes periodos de retorno, como se muestra en la tabla 6.

Aplicando los demás métodos y comparándolos con respecto a los análisis de frecuencia se obtienen los resultados mostrados en la figura 8.

**Tabla 6.** Caudales máximos para diferentes periodos de retorno en la estación Las Camelias

| Periodo de retorno $T_r$ | Factor de frecuencia $K_{Tr}$ | | Caudales máximos (m³/s) | |
|---|---|---|---|---|
| (años) | LogNormal Tipo II | Gumbel | LogNormal Tipo II | Gumbel |
| 2,33 | 0,03 | 0,00 | 435,39 | 431,74 |
| 5 | 0,75 | 0,72 | 530,60 | 526,29 |
| 10 | 1,32 | 1,30 | 604,99 | 603,31 |
| 25 | 2,01 | 2,04 | 695,83 | 700,62 |
| 50 | 2,51 | 2,59 | 761,65 | 772,80 |
| 100 | 3,00 | 3,14 | 826,15 | 844,46 |

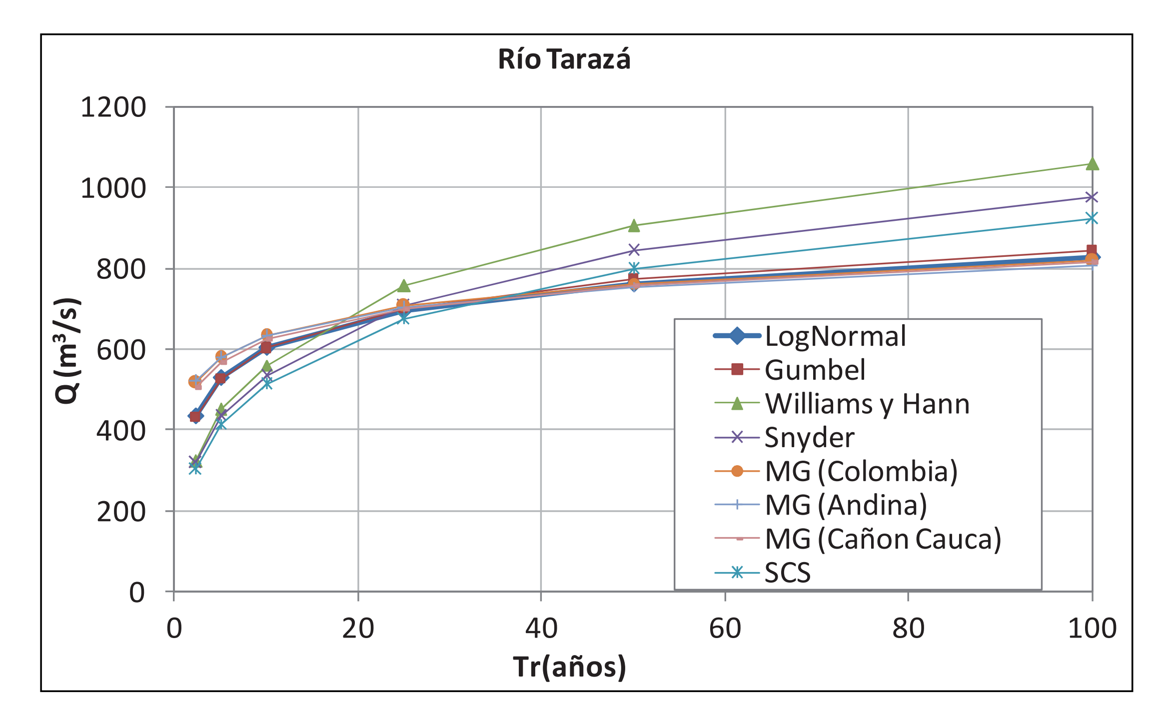



**Figura 8.** Resultados de los hidrogramas unitarios sintéticos y demás métodos en la cuenca definida por la estación Las Camelias



En la tabla 7 se muestran las caudales máximos obtenido por las diferentes metodologías y sus respectivos errores cuadráticos medios con respecto a los análisis de frecuencia.

En la tabla 7 se observa como, en comparación con los resultados del análisis de frecuencia empleando la función de distribución de probabilidad de Gumbel, es el modelo MG el que mejores resultados presenta (menores valores del coeficiente para la medición del error RMS, *Root Mean Square*) y que el hidrograma unitario sintético del SCS es el que menos desviación presenta entre los métodos de su tipo.

**Tabla 7.** Caudales máximos en la cuenca del río Tarazá a la altura de la estación Las Camelias por diferentes métodos ($m^3/s$)

| Período de retorno | Análisis de frecuencia | | Hidrogramas unitarios sintéticos | | | Modelo MG | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| (Años) | Log Normal | Gumbel | Williams y Hann | Snyder | SCS | Colombia | Región Andina | Subregión Cañón del Cauca |
| 2,33 | 435,39 | 431,74 | 322,27 | 317,78 | 302,35 | 516,76 | 520,74 | 506,35 |
| 5 | 530,6 | 526,29 | 451,59 | 434,48 | 416,23 | 577,9 | 578,94 | 568,69 |
| 10 | 604,99 | 603,31 | 559,83 | 532,5 | 512,56 | 633,41 | 631,78 | 625,27 |
| 25 | 695,83 | 700,62 | 755,63 | 707,34 | 674,82 | 706,78 | 701,62 | 700,07 |
| 50 | 761,65 | 772,8 | 906,18 | 841,99 | 798,53 | 762,28 | 754,45 | 756,66 |
| 100 | 826,15 | 844,46 | 1058,5 | 978,14 | 923,1 | 817,78 | 807,28 | 813,24 |
| RMS | 9,3 | - | 119,8 | 90,5 | 86,2 | 44,08 | 46,95 | 38,91 |

## 7. CONCLUSIONES

El modelo MG fue calibrado para Colombia, sus principales regiones geográficas y subregiones hidrológicamente homogéneas; los valores de caudales máximos obtenidos aplicando los modelos calibrados en este trabajo fueron comparados con los resultados obtenidos mediante el uso de otros modelos de estimación de caudales máximos; de esta manera se comprobó que el modelo es válido en la mayoría de los casos.

Se observa como el modelo MG calibrado en este trabajo presenta resultados más aproximados a los del análisis de frecuencia que los del modelo MG desarrollado por Maione y Tomirotti (2004) y el calibrado por Vélez, Quintero y Delgado (2006), que sobreestima considerablemente los caudales máximos respecto a los demás métodos.

En general, el modelo MG calibrado para una región particular permite estimar mejor los caudales máximos (respecto al análisis de frecuencia) que si se usa el modelo MG calibrado para toda Colombia, lo cual se explica a la luz de la gran variabilidad climática existente en el país.

Las ecuaciones del modelo MG calibrado para la región Orinoquía y la subregión Valle del Cauca muestran valores de ciertos parámetros mayores que los de las demás ecuaciones de este trabajo y que los de la ecuación desarrollada por Maione y Tomirotti (2004), además de mostrar una baja correlación en la regresión de la variable $Y$ (menor de 0,5), por lo que allí los resultados obtenidos con la aplicación de estos modelos no son confiables.

Las ecuaciones obtenidas para las demás regiones y subregiones muestran valores de parámetros

similares a los de la ecuación analítica de Maione y Tomirotti (2004) y semejantes entre sí. Esto quiere decir que las ecuaciones obtenidas para estas regiones y subregiones son aceptables.

En las subregiones Atrato y Nechí los modelos fueron calibrados con 13 y 8 estaciones respectivamente, por lo que el uso de estas ecuaciones debe hacerse con cuidado y los resultados pueden ser inciertos. La ecuación de la subregión La Guajira fue calibrada con sólo cinco estaciones por lo que no es recomendable aplicar esta ecuación.

Las estaciones de medición de caudal en las regiones Amazonía y Orinoquía no se encuentran espacialmente distribuidas en toda el área, sino que se concentran en determinados sitios, por lo que se recomienda tener en cuenta la localización de la cuenca en estudio cuando se vayan a utilizar estas ecuaciones.

En un sitio del río Tarazá instrumentado con una estación de medición caudal, se estimaron caudales máximos instantáneos mediante diferentes métodos. Los resultados reflejan que empleando el modelo MG calibrado en este trabajo se obtienen resultados aproximados a los obtenidos por el método de análisis de frecuencia, a diferencia de lo que ocurre empleando la metodología de las hidrógrafas unitarias sintéticas.

La escasa cantidad y calidad de la información hidroclimatológica disponible en Colombia son limitantes, ya que de esto depende la calidad de los modelos hidrológicos creados para la región. Esto se puede mejorar mediante la instalación de más estaciones y una correcta medición de los caudales. Un hecho que corrobora el estado de la información disponible en el país es la eliminación del 20 % del total de la información disponible para la calibración de los modelos en este trabajo, por motivos de calidad y cantidad. Esto, sumado a la gran incertidumbre que se tiene al estimar eventos extremos, genera problemas para realizar una buena estimación.

## AGRADECIMIENTOS

A la Escuela de Geociencias y Medio Ambiente de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, en especial al profesor Jaime Ignacio Vélez, por facilitar la información hidrológica con la que se realizó este trabajo netamente académico.

## REFERENCIAS

Beretta, Alessandro; Maione, Ugo e Tomirotti, Massimo. (2001), "Aggiornamento del modello MG per la stima regionale delle portate al colmo di piena dei corsi d'acqua italiani". *L'Acqua*, vol. 2001, No. 4, pp. 7-19.

Ceballos, Adrián y Góez, Catalina. *Detección de valores anormalmente extremos "outliers" en series hidrológicas*. Medellín: Tesis de pregrado (Ingeniería Civil). Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Minas, 2003.

Chow, V. T.; Maidment, D. R. y Mays, L. W. *Hidrología aplicada*. Bogotá: McGraw-Hill, 1994. 583 p.

Maione, Ugo (1997). "Un modello probabilistico per la stima delle portate di piena dei corsi d'acqua italiani". *Seminario su Nuovi Sviluppi Applicativi dell'Idraulica del Corsi d'Acqua,* pp. 25-31. Bressanone (27-31 gennaio).

Maione, Ugo and Tomirotti, Massimo (2004). "A transnational regional frequency analysis peak flood flows". *L'Acqua*, vol. 2004, No. 2, pp. 9-17.

Mesa, Oscar José; Poveda, Germán y Carvajal, Luis Fernando. *Introducción al clima de Colombia*. Bogotá: Imprenta Universidad Nacional de Colombia, 1997.

Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín (Unalmed) y Convenio Interinstitucional Cátedra del Agua. *Balances hidrológicos y atlas digital de Antioquia*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2001.

Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín (Unalmed) y Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). *Atlas hidrológico de Colombia*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2000.

Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín (Unalmed). *HidroSIG, versión 3.0 beta. Manual de usuario*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia, 2003. 109 p.

Vélez, María Victoria; Quintero, Wilson y Delgado, Juan Pablo. (2006). "Implementación del modelo MG para Antioquia y el Eje Cafetero". *Avances en Recursos Hidráulicos*, No. 14 (octubre), pp 87-96.